

תנועת אלקטרונים בשדה חשמלי

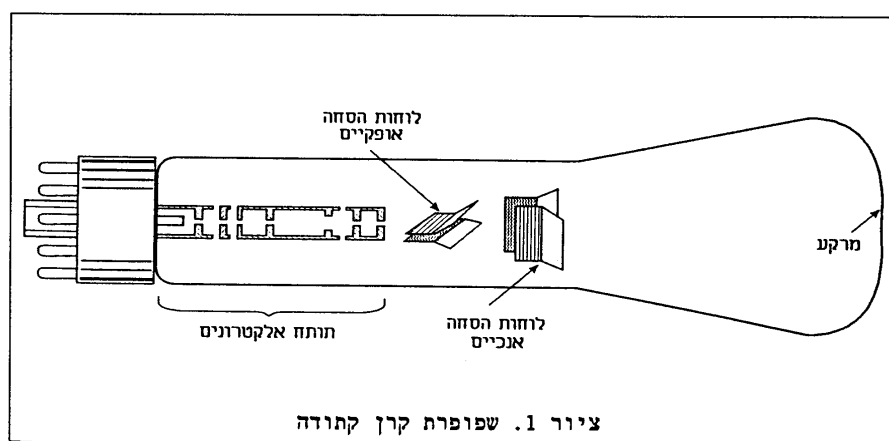
ספרות עזר

- Mechanics, Berkeley Physics Course, Vol. 1, Chapter 4.
- Mechanics, Berkeley Physics Course, Vol. 1, Chapter 3, p.77.
- Electricity and Magnetism, Berkeley Physics Course, Vol.2, Chapter 6, P. 201-203
- Physics, R. Resnick & D. Halliday, Part 2, Chapter 34

מכשור:

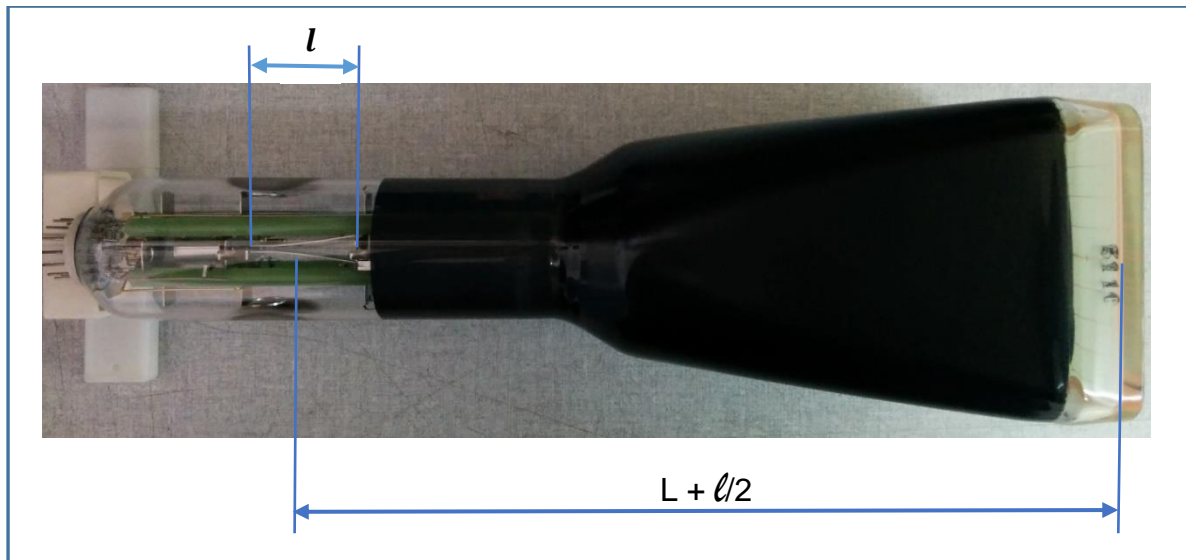
אוסצילוסקופ אנלוגי עם שפופרת 150UTM31, שני ספקי מתח עד 50V, שני מולטימטרים, שלושה סלילים, תילים צבעוניים, כבל קואקסיאלי.

שפופרת קרן קתודה



בניסוי הזה נעבור מהתחום של העולם המיקרוסקופי אל העולם המיקרוסקופי - מגדלים הנמדדים במידות של יום-יום, כגון סנטימטרים, גרמים ומטרים לשנייה, לעולם של החלקיקים הזעירים ביותר, שמסתם נמדדת ביחידות של 10^{-30} ק"ג, ומהירותם (במעבדה שלנו!) נמדדת במיליוני מטרים לשנייה. בניסויים אלה נחקור את התנועה של אלקטרונים הנמצאים בשדות חשמליים ומגנטיים.

האלקטרונים נוצרים על ידי תותח אלקטרונים בתוך שפופרת זכוכית המרוקנת מאוויר (לחץ של כ- 10^{-6} Atm) הנקראת **שפופרת קרן קתודה** או שק"ק בראשי תיבות (ובאנגלית Cathode Ray Tube או CRT). שפופרת זו היא המרכיב העיקרי באוסצילוסקופ, שהוא מכשיר מדידה חשוב ביותר במדע ובטכנולוגיה. השפופרת מתוארת בציור 1. אלקטרונים נפטים מקתודה לוחטת ומואצים וממוקדים על ידי מערכת אלקטרודות הנקראת תותח אלקטרונים (ציור 2).

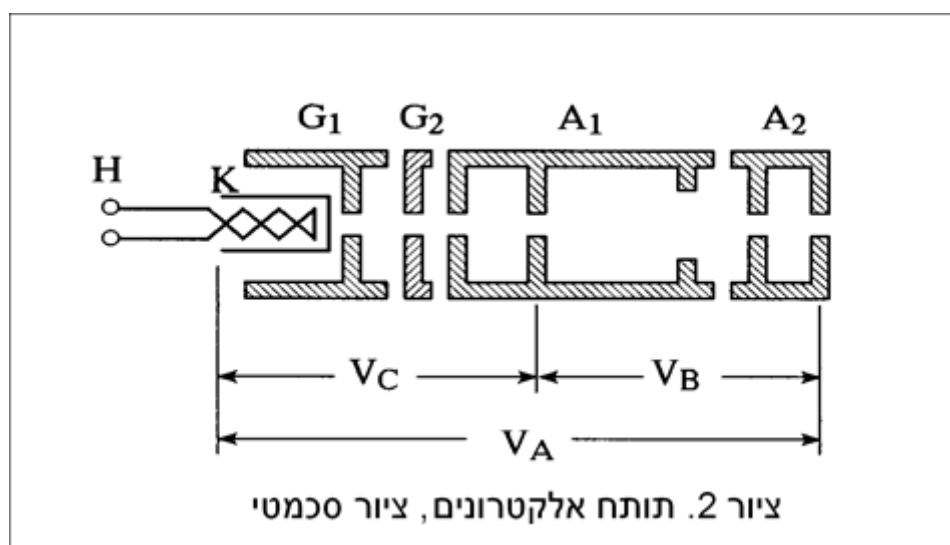


ציור 1א. השק"ק בו משתמשים בניסוי.

האלומה של האלקטרונים אינה מתפזרת על ידי התנגשויות עם מולקולות, כיוון שהשפופרת מרוקנת מאוויר. האלקטרונים נעים באופן חופשי עד שהם פוגעים בדופן הקדמי של השפופרת (המרקע) המצופה בחומר זרחני (ראה ציור 1א). חומר זה מאיר כאשר אלקטרונים פוגעים בו, ונקודת אור נראית על המרקע.

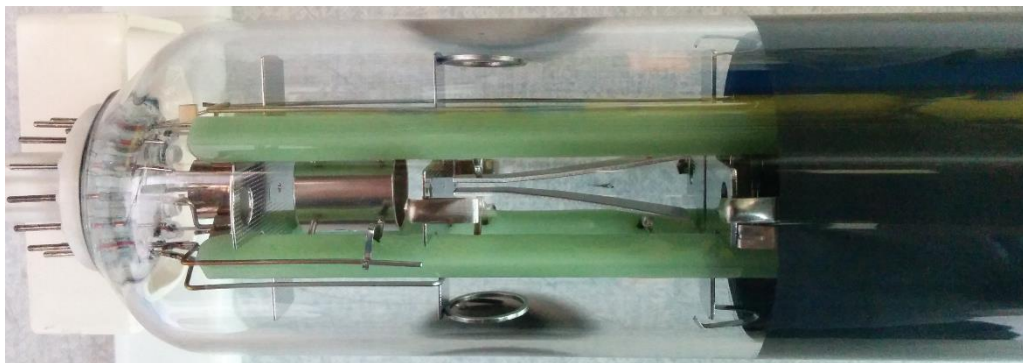
אפשר ליצור שדות חשמליים בעזרת שני זוגות של לוחות מתכת הנמצאים בתוך השק"ק. אם יש הפרש פוטנציאל בין שני הלוחות השייכים לזוג, השדה החשמלי יגרום להסחת אלומת האלקטרונים, ולכן גם להסחת נקודת הפגיעה של האלומה במרקע.

תותח האלקטרונים מתואר ביתר פירוט בציור 2. הקתודה K היא גליל צר שקצהו מצופה בתחמוצות של Sr ו-Ba. כאשר חומר זה מחומם, חלק מן האלקטרונים שלו מקבלים מספיק אנרגיה כדי להשתחרר ונפלטים ממנו. תהליך זה נקרא פליטה תרמיונית. כדי לחמם את הקתודה משתמשים בחוט לוחט H (Heater), המבודד מהקתודה בשרוול העשוי קרמיקה. ארבע אלקטרודות מוצבות לפני הקתודה ותפקידן להאיץ ולמקד את אלומת האלקטרונים היוצאת מן הקתודה. האלקטרודה G1 היא שריג בקרה,



ותפקידה לווסת את זרם האלקטרונים העובר דרכה. לצורך זה, שמים על השריג פוטנציאל שלילי של 4 עד 20 V ביחס לקתודה K. כיוון שהפוטנציאל הוא שלילי, אלקטרונים איטיים נדחים לקתודה, וכך ניתן לשלוט על עוצמת אלומת האלקטרונים. האלקטרודה G_2 מחוברת ל- A_2 , ושתייהן שריוות בפוטנציאל V_A , הגבוה במאות וולטים מזה של הקתודה K. השדה הנוצר על ידי אלקטרודות אלה מאיץ את אלקטרונים לאורך ציר השפופרת.

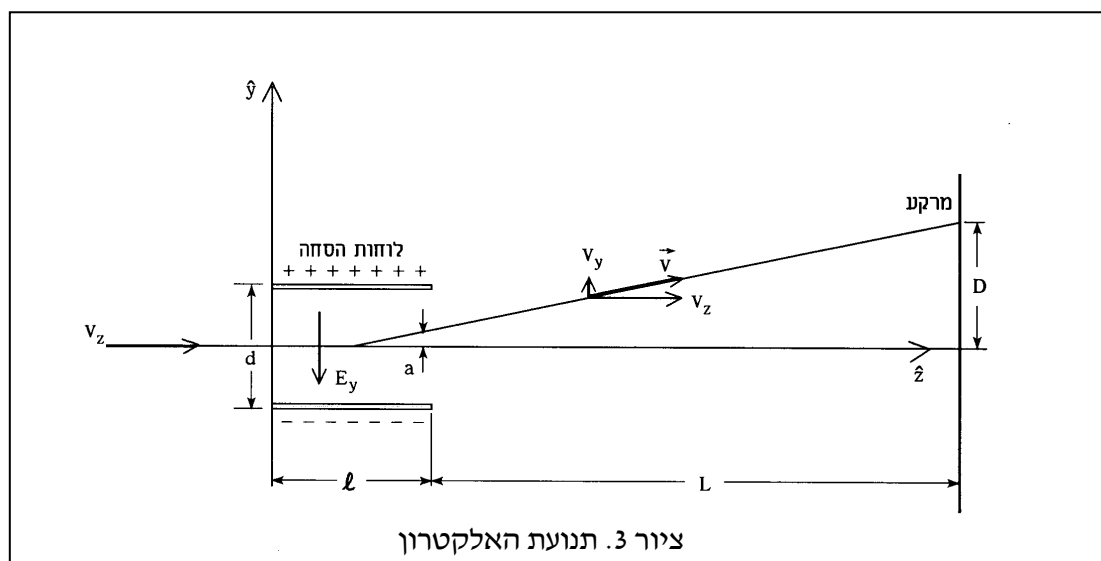
התפקיד של אלקטרודה A_1 הוא למקד את אלומת האלקטרונים. היא שרויה בפוטנציאל הקתודה, אבל הפוטנציאל שלה נמוך לעומת V_A . הפרש הפוטנציאלים הזה יוצר שדות חשמליים בין A_1 ו- G_2 ובין A_1 ו- A_2 הממקדים את האלומה. האלקטרונים היוצאים מהחריר שב- G_1 בכוונים שונים מרוכזים לאלומה מקבילה וצרה שקוטרה נקבע בעיקר ע"י קוטר החריר ב- G_2 . מיקוד טוב תלוי בעיקר בבחירת הפוטנציאלים V_A ו- V_C .



ציור 2א. תותח האלקטרונים בשק"ק שבמעבדה.

תנועת אלקטרון בשדה חשמלי – רקע תיאורטי

כדי לנתח את התנועה של האלקטרון בתוך השפופרת, אנו נבנה מודל פשוט שאינו מתאר במדויק את המערכת אך ניתן לחישוב בצורה פשוטה. אנו נניח שבין לוחות ההסחה יש שדה E קבוע הניצב ללוחות, ומחוץ ללוחות השדה מתאפס. התנועה של האלקטרון במודל זה מתוארת בציור 3.



ציר \hat{Z} הוא לאורך ציר השפופרת, וציר \hat{y} בכיוון הניצב. בזמן $t = 0$ האלקטרון נמצא בראשית הצירים עם מהירות v_z בכיוון \hat{Z} . הוא עובר את האזור בין הלוחות ומגיע לנקודה $z = l, y = a$ בקצה הלוחות עם מהירות v_y בכיוון \hat{y} . אחר כך הוא עובר את המרחק L ופוגע במרקע. ההסחה שלו (בכוון \hat{y}) על המרקע היא D .

אם מתקיים $\vec{E} = E_y \cdot \hat{y} = E \cdot \hat{y}$, משוואת התנועה של האלקטרון בשדה \vec{E} היא:

$$m\ddot{y} = eE \quad (1)$$

הפתרון למשוואה זאת עם תנאי ההתחלה $y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0$ הוא:

$$\dot{y} = eEt / m \quad (2א)$$

$$y = \frac{eEt^2}{2m} \quad (2ב)$$

המהירות שלו בכיוון \hat{Z} אינה משתנה:

$$z = v_z t \quad (3)$$

לכן הוא מגיע לקצה הלוחות, לנקודה $z = l$, בזמן $t = l / v_z$. אם מציבים זאת במשוואות (2) מקבלים את הביטויים הבאים עבור המהירות הסופית v_y וההעתק בקצה הלוחות a :

$$v_y = \left(\frac{eE}{m}\right) \left(\frac{l}{v_z}\right) \quad (4א)$$

$$a = \left(\frac{eE}{2m}\right) \left(\frac{l}{v_z}\right)^2 \quad (4ב)$$

הזמן T הדרוש לעבור את האזור שאחרי הלוחות שבאורך L הוא $T = L / v_z$ (לפי משוואה 3).

המהירות של האלקטרון בכיוון \hat{y} באותו אזור היא קבועה ושווה ל- v_y ולכן ההסחה בכיוון \hat{y} באזור הזה היא: $v_y T = v_y L / v_z$.

לסיכום:

$$D = a + L \frac{v_y}{v_z} = \left(\frac{eE}{mv_z^2}\right) l \left(L + \frac{1}{2}l\right) \quad (5)$$

אם V_d הוא המתח על לוחות ההסחה ו- d המרחק בין הלוחות, אזי $E = V_d / d$. המהירות v_z היא תוצאה של תאוצה במתח V_A . לפי חוק שימור אנרגיה:

$$\frac{1}{2} m v_z^2 = e V_A \quad (6)$$

אם מציבים את (6) ב- (5) מקבלים:

$$D = \frac{1}{2} \left[\frac{l(L + \frac{1}{2}l)}{d} \right] \left(\frac{V_d}{V_A} \right) \quad (7)$$

התוצאה הזו היא מעניינת כי היא אומרת שההסחה של חלקיק טעון כלשהו היא שווה! ההסחה אינה תלויה במטען החלקיק או במסתו, אלא רק בממדים הגיאומטריים של השפופרת וביחס V_d / V_A . לוחות ההסחה בשק"ק אינם לוחות מישוריים. הם מתוארים בציר 1 של ניסוי זה. הביטוי עבור ההסחה D יהיה שונה ממשוואה (7). יחד עם זאת, לא קשה להראות שתלות ב- V_d / V_A לא תשתנה, כלומר:

$$D = \alpha \frac{V_d}{V_A} \quad (8)$$

כאשר α הוא גורם פרופורציה בעל מימד אורך שמבטא את הערך האפקטיבי של $\frac{1}{2}l(L + \frac{1}{2}l)/d$.
בניסוי הנוכחי, נבדוק באיזה מידה מתקיים הקשר (8).

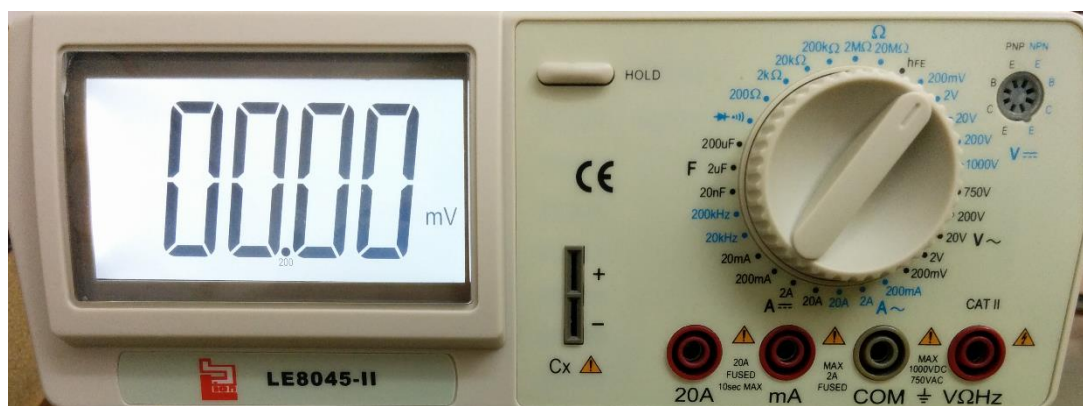
מידות גיאומטריות בשק"ק (ראה ציור 1א וציור 3)	
$L + \frac{1}{2}l = 252.0 \pm 0.5 \text{ mm}$	מרחק מאמצע זוג לוחות ההסחה למרקע
$l = 36.4 \pm 0.1 \text{ mm}$	אורך לוח ההסחה
$d = 2.0 \pm 0.1 \text{ mm}$	מרחק בין זוג לוחות אופקיים

שאלות הכנה

1. הרגישות של לוחות ההסחה מוגדרת כ- D/V_d . מצאו ביטוי לרגישות כפונקציה של L , l , d .
האם הרגישות תלויה במתח ההאצה? האם הרגישות תלויה בסוג החלקיק המואץ?
2. לאיזה זוג לוחות יש רגישות גדולה יותר (ראה ציור 1)? מהו יחס הרגישויות?
3. אם מתח ההאצה הוא $V_A = 2000 \text{ V}$, איזה מתח הסחה V_d דרוש לזוג הלוחות כדי להסיח את האלומה ב- 3 cm ? הניחו כי השדה החשמלי קבוע בין הלוחות ומתאפס מחוץ ללוחות.
4. חשבו את המהירות v_z של האלקטרון עבור $V_A = 1300 \text{ V}, 1400 \text{ V}, 1500 \text{ V}$.
5. מדוע מותר להזניח את כוח הכובד הפועל על האלקטרון? הצדיקו הזנחה זאת בהנחה ש-
 $V_A > 1000 \text{ V}$.

מכשיר מדידה – המולטימטר הדיגיטלי

מכשיר המדידה שלנו במעבדה הוא המולטימטר הדיגיטלי. מכשיר זה הוא רב-תכליתי ומדויק מאוד. הוא מודד מתחים, זרמים והתנגדויות בתחומי פעולה שונים. תחומי הפעולה משתנים בששה סדרי גודל. תמונת המולטימטר נראית בציר 4.



ציר 4

הוראות הפעלה של המולטימטר הן כדלקמן:

1. הדליקו את המכשיר בעזרת המתג שנמצא בגב של המכשיר.
2. בחרו את הפונקציה הנמדדת ואת תחום המדידה הרצוי על ידי סיבוב על המתג העגול. הפונקציות השונות והיחידות שלהן רשומות על המכשיר בצבע כחול או שחור.
3. רצוי להתחיל עם התחום הגדול ביותר ולרדת לתחום רגיש יותר במידת הצורך. המספר הכתוב ליד המתג העגול נותן את המספר הגדול ביותר הנמדד בתחום הפעולה הנדון. לדוגמא, אם בחרתם על המספר המסומן ב-200V, אזי אפשר למדוד מתחים עד 200V. אם מנסים למדוד גודל מעל זה, המספרים בתצוגה יבהבו.
4. מחברים את מקור המתח (או זרם) הנמדד עם שני תילים מסוג "בננה". תיל אחד (בצבע שחור) מחברים אל הכניסה COM. אם מודדים מתח או התנגדות, מחברים את התיל השני (בצבע אדום) לכניסה $V\Omega Hz$. אם מודדים זרם, מחברים את התיל השני ל- mA או $20A$ בהתאם לגודל הזרם הצפוי. בניסוי זה יש להשתמש בכניסה של **הזרם הגבוה**.

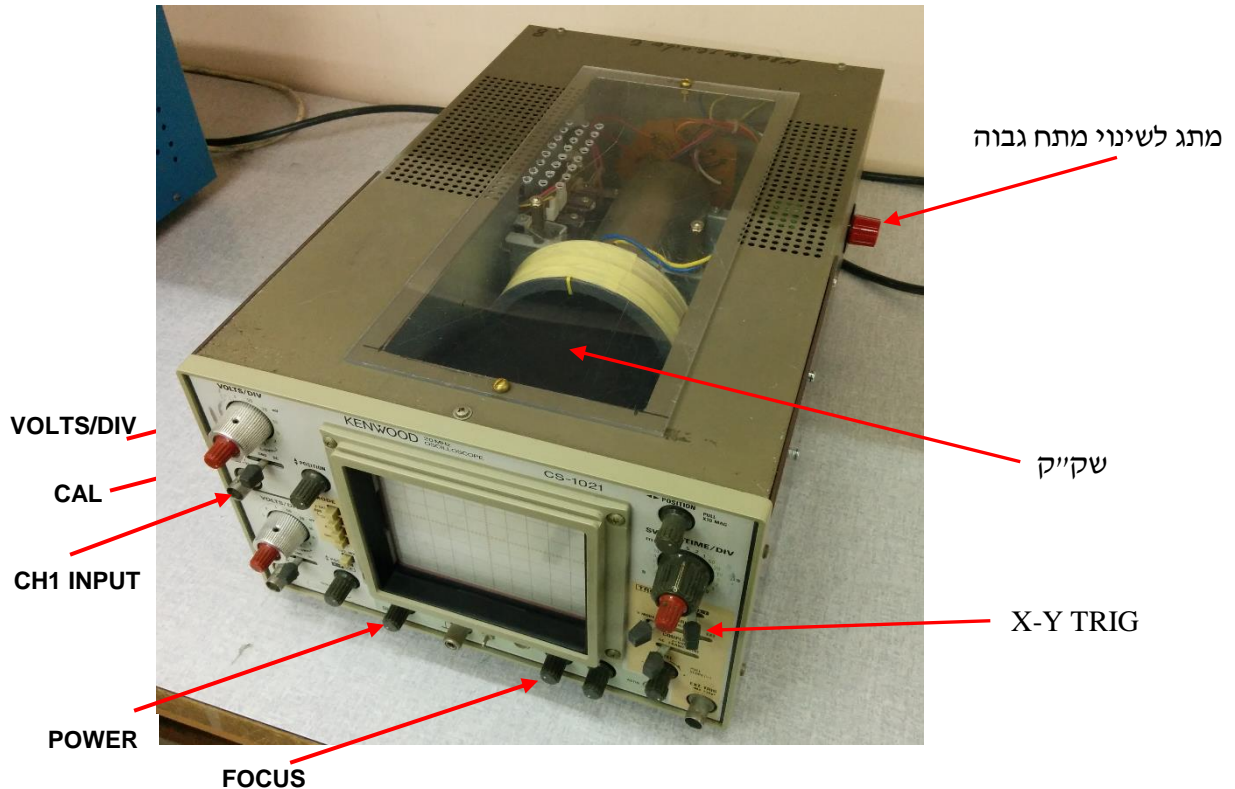
הכנת המכשור (20 נקודות)

על שולחן המעבדה תמצאו אוסצילוסקופ (סקופ) אנלוגי עם שק"ק, ראה ציר 5, ושני ספקי מתח של עד 50V. כדי להפעיל את הסקופ יש לסובב את המתג POWER. תותח האלקטרונים נראה דרך חלון שקופ בסקופ האנלוגי. בגב של הסקופ ישנם שלושה זוגות שקעים. זוג השקעים שרשום עליהם V_a מיועד למדידת מתח ההאצה (מתח גבוה) על השק"ק. כדי לקבל קריאה נכונה של המתח הגבוה **יש להכפיל את קריאת המולטימטר ב-10,000**. נוח לבחור בסקלה של 2V

במולטימטר ואז תקבלו ישר את קריאת המתח בוולטים. זוג השקעים שרשום עליהם V_d מיועד למדידת מתח על זוג לוחות ההסחה האנכיים.

בצד ימין של הסקופ נמצא מתג עגול בצבע אדום והוא מיועד לשינוי של מתח ההאצה. כדי לשנות את מתח ההאצה יש לסובב את המתג. קיימים שישה מצבים קבועים של המתג הזה.

חשוב: יש לסובב את המתג בעדינות, אין להפעיל עליו כוח רב.



ציור 5



ציור 6: כבל קואקסיאלי-
בננה. בצד אחד של הכבל
ישנו מחבר BNC ובצד השני
זוג תילים מסוג "בננה".

1. בניסוי הזה נשתמש בזוג לוחות הסחה האנכיים בלבד. חבר את זוג הלוחות האנכיים לספק שמסוגל להגיע לפחות למתח של 50V. הכניסה לזוג הלוחות האנכיים מסומנת ב- INPUT CH1 (ראה ציור 5), והכניסה לזוג הלוחות האופקיים מסומנת ב- CH2 INPUT. כדי להתחבר לכניסה של לוחות ההסחה יש להשתמש בכבל קואקסיאלי (ציור 6).

2. יש לוודא שמתג CH1 INPUT נמצא במצב DC. העבר את הבורר VOLTS/DIV ל-5V וסובב את הכפתור האדום CAL לכיוון השעון עד הסוף (ראה ציור 5). מתג זה "מחלק" את מתח הכניסה ומקטין את המתח שנופל על לוחות ההסחה, באופן שמאפשר שליטה עדינה יותר במתח של לוחות ההסחה.

3. הארק את הלוחות האופקיים: מתג CH2 INPUT צריך להיות במצב GND. הבורר TRIG צריך להיות במצב X-Y. המצב של שאר המתגים והכפתורים של הסקופ לא משנה.

4. הדלק את הסקופ ואת הספק. הגבל את הזרם של הספק ל-1A באופן בטיחותי.

5. כוון בעזרת הכפתור FOCUS את הנקודה על המרקע כך שהיא תהיה קטנה וחדה.

חשוב: בסיום הניסוי או בהפסקות ארוכות יש לכבות את הסקופ וספקי מתח.

ניסוי איכותי

שנו את המתח V_d על הלוחות בעזרת ספק המתח ושימו לב לתחום ההשתנות של ההסחה D בהתאם. אם הקו שאתם מקבלים לא אנכי, חברו ספק מתח נוסף לזוג השקעים V_s שנמצאים בגב הסקופ, הגבילו את הזרם ל-1A והעלו בהדרגה את המתח עד שתקבלו קו אנכי. יכול להיות שתצטרכו להחליף את הקוטביות של המתח. הסבר על הכניסה V_s מופיע בניסוי הבא, "תנועת אלקטרונים בשדה מגנטי". וודאו שהנקודה $D=0$ נמצאת בראשית הצירים. חזרו על השלב הזה עבור מתחי האצה V_A שונים.

ניסוי כמותי

1. למדידת V_d חבר מולטימטר לזוג השקעים שנמצאים בגב הסקופ ומסומנים ב- V_d . למדידת המתח V_A חבר מולטימטר לזוג השקעים שנמצאים בגב הסקופ ומסומנים ב- V_A .
2. מטרתנו בניסוי היא לבדוק את הקשר התיאורטי (8). לכן יש למדוד את ההסחה עבור ערכים שונים של V_A ו- V_d ולשרטט גרף של ההסחה D כפונקציה של היחס V_d/V_A . מדוד את ההסחה D כפונקציה של V_d עבור ערך אחד של V_A . נוח למדוד את V_d עבור ערכים נתונים של D , לדוגמא, כל 0.5cm. אל תשכח למדוד ערכים שליליים של V_d על ידי הפיכת הקוטביות. **(30 נקודות)**
3. שרטט גרף של ההסחה D כפונקציה של היחס V_d/V_A . אם טעית במדידה כלשהי, הטעות מיד תתגלה וניתן לחזור על המדידה ולתקן. **(20 נקודות)**
4. מדוד את ההסחה D כפונקציה של V_A עבור ערך אחד של V_d . עשה זאת עבור ששת הערכים השונים של V_A . שמור על הערך V_d קבוע ושנה רק את המתח ההאצה V_A . הוסף את הנתונים החדשים לגרף של D לעומת V_d/V_A . **(30 נקודות)**

ניתוח נתונים – שיעורי בית להגשה

1. בצע רגרסיה לינארית למציאת הקווים הישרים המתאימים ביותר לנקודות המדודות. יש למצוא את הקווים המתאימים לנוסחה (8) לשני המקרים: V_A קבוע ו- V_d קבוע. הוסף את הקווים הישרים שמצאת לגרף.
2. השווה את ערכי השיפוע α שקיבלת ברגרסיה בשני המקרים (ראה סעיף 1) השונים והוכח ש- α אינה תלויה במתחים.
3. לכל מדידה בנפרד, קח את הערך של α שקבלת בסעיפים הקודמים (כולל חישוב השגיאה) והשווה אותו עם הערך של α המתקבל מהמודל הפשוט, כלומר ל- $\frac{1}{2}l(L + \frac{1}{2}l)/d$. (ראה משוואות 7 ו-8). עשה זאת תוך התחשבות בשגיאות של כל אחד מהגדלים.

4. נסח מסקנה: דון בין היתר גם עד כמה המודל הפשוט מתאים לרמת הדיוק של המכשירים, כלומר האם ייתכן בניסוי זה מצב שבו רמת הדיוק של המכשירים גבוהה מרמת הדיוק של הקירוב במודל הפשוט. מהם הקירובים של המודל הפשוט ומתי מותר לנו לעשות אותם (התייחס לגדלים הגיאומטריים של המערכת)? כיצד נראה זאת מהתוצאות (אם בכלל)? מהן הציפיות שלך ומה קיבלת? דון במידת הליניאריות שקבלת, מה ניתן להסיק ממנה?